

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-20-36

Траутвайн А.И., *Кожеевина А.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: syryhalina@gmail.com

МЕХАНИЗМЫ И ФАКТОРЫ, УХУДШАЮЩИЕ НАБОР ПРОЧНОСТИ ГРУНТА, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ НА ПРИМЕРЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ГИДРОПОЛИМЕРА И КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ POWER STAB

Аннотация. Проведена оценка эффективности применения многокомпонентного гидрополимера и концентрированной минеральной смеси POWER STAB при стабилизации и укреплении грунта подъездной автомобильной дороги к кусту газовых скважин Харасавэйского ГКМ.

Установлено, что ведение комплекса добавок POWER STAB приводит к снижению прочностных показателей образцов укрепленного грунта по сравнению с контрольными образцами без использования модификаторов. Достигнуть необходимые физико-механические показатели укрепляемого грунта согласно проекту с расходом цемента 5% и комплекса добавок (многокомпонентного гидрополимера и концентрированной минеральной смеси POWER STAB) не представляется возможным. При этом марка по прочности образцов проектного состава соответствует М20 (требуемая марка должна соответствовать М60). Жидкий стабилизатор ГП POWER STAB оказывает негативное влияние на показатель морозостойкости укрепленного грунта. Морозостойкость укрепленного грунта с использованием комплекса добавок POWER STAB, в соответствии с проектным составом, составила F15 (требуемая марка должна соответствовать F50). На основании полученных физико-механических показателей была предпринята попытка определить причину отрицательного влияния добавок POWER STAB на свойства укрепленного грунта путем исследования прочности и структуры цементного камня, в состав которого были введены данные добавки. Также был исследован высушенный образец ГП POWER STAB с помощью ИК-спектроскопии.

Ключевые слова: стабилизация, укрепление грунтов, добавки POWER STAB, физико-механические показатели, активность цемента, ИК-спектроскопия.

Введение. Стабилизация грунтов является важной инженерной задачей, направленной на улучшение их физико-механических свойств для использования в качестве оснований автомобильных и железных дорог, а также в качестве конструкционных материалов. Основные цели стабилизации включают повышение прочности, снижение водопроницаемости, а также увеличение общей долговечности грунтового основания дорожной одежды. Для достижения этих целей широко применяются различные химические и полимерные добавки, которые взаимодействуют с компонентами грунта и/или гидравлическими вяжущими (например, цементом), формируя упрочненную структуру.

Несмотря на доказанную эффективность многих методов химической и полимерной стабилизации, в ряде случаев их применение может не приводить к ожидаемому упрочнению, а, напротив, вызывать ухудшение набора прочности или даже снижение уже достигнутых показателей. Это может быть обусловлено множеством факторов, включая неправильный выбор типа или дозировки добавки, специфические характеристики самого грунта (минералогический и химический состав, содержание органических веществ, кислотность), а также неблагоприятные условия окружающей среды и эксплуатации.

Одной из распространенных причин ухудшения набора прочности является ингибирование гидратации цемента избытком поверхностно-активных и гидрофобизирующих добавок использование неоптимальных, как правило, избыточных дозировок стабилизирующих добавок.

Некоторые химические стабилизаторы относятся к гидрофобизирующим поверхностно-активным веществам (ПАВ).

Гидрофобизирующий эффект, безусловно, полезен для снижения водонасыщения готового материала, повышения его морозостойкости и устойчивости к капиллярному подсосу влаги. Однако, если этот эффект достигается за счет создания барьера для воды на поверхности самого цементного зерна, то при избытке добавки он становится контрпродуктивным для набора прочности, обеспечиваемого процессами цементации.

Механизм этого явления заключается в том, что молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности частиц цементного клинкера. При избыточном количестве ПАВ эта адсорбция может приводить к образованию достаточно плотных пленок, которые создают барьер, препятствующий эффективному контакту воды с цементными минералами (такими как алит (C3S), белит (C2S),

трехкальциевый алюминат (СЗА)). Это, в свою очередь, замедляет или частично блокирует процессы растворения цементных минералов и последующей кристаллизации новообразований [1–5].

Избыточное количество некоторых полимерных добавок или тонкодисперсных порошковых компонентов, не обладающих вяжущими свойствами или не вступающих в активное химическое взаимодействие с компонентами системы "грунт-вяжущее", может привести к механическому ослаблению структуры. Вместо формирования прочного каркаса, где частицы грунта связаны продуктами гидратации цемента и/или полимерными мостиками, происходит "разбавление" цементной или полимерцементной матрицы.

Этот механизм отличается от химического ингибирования гидратации. Здесь основная проблема заключается в нарушении физической структуры и механики взаимодействия частиц. Избыток добавки мешает формированию плотной и однородной структуры цементогрунта или полимергрунта. Эффективность полимерных и порошковых добавок зависит не только от их химической природы, но и от их дисперсности и способности равномерно распределяться в смеси. Если добавка плохо диспергируется, она может не только обволакивать отдельные частицы, но и сама образовывать агломераты, которые будут служить концентраторами напряжений и локальными слабыми зонами в структуре материала.

Еще одним важным фактором является pH среда и химическая природа поровой жидкости, что создает водный раствор стабилизирующей или полимерной добавки. Кислотность или щелочность (pH) среды, в которой происходит твердение цементогрунта, а также химический состав поровой жидкости, играют значительную роль в кинетике гидратации цемента и стабильности образующихся продуктов [6–8].

Кислая среда ($\text{pH} < 7$) является агрессивной по отношению к портландцементу и его продуктам гидратации. Основные связующие компоненты цементного камня – гидроксид кальция (портландит, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) и гидросиликаты кальция (C-S-H гель) – нестабильны в кислой среде и подвергаются растворению. Это приводит к разрушению структуры цементного камня, потере связности между частицами грунта и, как следствие, к резкому снижению прочности. В [8] прямо указывается: "Уменьшение pH воды затворения цементного раствора приводит к уменьшению прочности образцов на сжатие". Необходимость предварительного известкования кислых грунтов перед их укреплением цементом также

косвенно свидетельствует о проблемах гидратации цемента и набора прочности в кислой среде [9–12].

Портландцемент сам создает высокощелочную среду ($\text{pH} \approx 12.5\text{--}13.5$) в процессе гидратации, которая является оптимальной для формирования и стабильности его основных гидратных фаз. Однако, если исходный грунт или вносимые добавки создают экстремально высокие значения pH, это также может повлиять на процесс гидратации цемента.

Кроме того, известно, что некоторые полимерные добавки могут быть нестабильны при очень высоких pH.

Важно учитывать, что pH самого грунта и pH вносимых жидких добавок (растворов, эмульсий) могут взаимодействовать. При их смешивании происходит изменение pH, которое может быть неоднородным в микрообъемах смеси. Например, некоторые водорастворимые полимеры, содержащие амидные группы, подвержены гидролизу при высоких значениях pH (характерных для цементных систем), что может приводить к изменению их заряда, молекулярной массы и, соответственно, их взаимодействия с частицами грунта. При низких значениях pH и повышенных температурах для таких полимеров возможно образование нерастворимых в воде сшитых структур за счет формирования имидных мостиков между макромолекулами. Такое сшивание, если оно чрезмерно или неконтролируемо, может привести к снижению способности полимера эффективно связывать частицы грунта [13–16].

Сроки схватывания цементогрунтовой смеси являются важным технологическим параметром. Некоторые химические добавки, особенно ускорители схватывания, могут значительно сокращать время до начала потери подвижности смеси.

С другой стороны, избыточное замедление процессов схватывания и твердения также нежелательно. Оно может быть вызвано рядом факторов, включая присутствие ингибиторов гидратации (например, органических веществ в грунте, некоторых ПАВ), использование слишком больших дозировок замедляющих добавок или низкие температуры окружающей среды. Замедленный набор прочности удлинит общие сроки строительства, делает свежеложенный и еще не набравший достаточной прочности материал уязвимым к разрушающему воздействию внешних факторов [16–18].

Эффективность полимера как стабилизирующей добавки во многом определяется его способностью образовывать прочную и стабильную

трехмерную сетку или адгезионные пленки, которые эффективно связывают частицы грунта между собой и/или с продуктами гидратации цемента. Если полимер плохо сцепляется (адгезирует) с минеральными частицами грунта или с новообразованиями цементного камня, он не сможет эффективно выполнять свою роль связующего, то есть "склеивать" компоненты системы и передавать напряжения между ними. Прочность и целостность системы "грунт-полимер-цемент" (или "грунт-полимер") во многом определяется силой адгезионных связей на границах раздела фаз: полимер-частица грунта, полимер-цементный камень, полимер-полимер (когезия самого полимера).

Хотя в некоторых исследованиях установлено отсутствие негативного влияния конкретных полимерных растворов на сдвиговую прочность песчаного грунта, ситуация с глинистыми грунтами может быть значительно сложнее из-за их высокой удельной поверхности, сложного минералогического и химического состава, а также способности к ионному обмену и набуханию [19].

Одной из проблем может быть конкурентная адсорбция. Если в системе "грунт-полимер" или "грунт-полимер-цемент" присутствуют другие поверхностно-активные вещества (например, ПАВ из состава полимерной эмульсии; компоненты органического вещества самого грунта; другие добавки), они могут конкурировать с основным связующим полимером за адсорбционные центры на поверхности частиц грунта или цемента. Если эти конкурирующие вещества обладают более высоким сродством к поверхности или присутствуют в больших концентрациях, они могут "заблокировать" поверхность, снижая эффективную адгезию основного полимера и, как следствие, прочность всей системы.

Кроме того, старение полимера или изменение условий окружающей среды (рН, температура, влажность) с течением времени могут привести к ослаблению адгезионных связей. Деструкция полимера приводит к изменению его химической структуры, что может негативно повлиять на его адгезионные свойства.

Эффективность химических и полимерных добавок и, соответственно, прочностные характеристики укрепленного грунта могут существенно зависеть от внешних условий, в которых происходит его приготовление, твердение и последующая эксплуатация.

Высокая концентрация растворенных солей в грунтовых или поровых водах является серьезным фактором, способным негативно повлиять как на процессы твердения цементных систем,

так и на стабильность и эффективность большинства полимерных добавок. Засоленные грунты сами по себе часто характеризуются пониженной прочностью и повышенной сжимаемостью [20].

Различные соли по-разному влияют на кинетику гидратации. Например, хлориды в умеренных концентрациях могут ускорять схватывание и твердение, но в высоких концентрациях, а также многие сульфаты, могут замедлять эти процессы или изменять морфологию образующихся кристаллогидратов, что сказывается на микроструктуре и прочности цементного камня.

Сульфаты (Na_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 и др.), присутствующие в засоленных водах, являются основной причиной сульфатной коррозии цементного камня, ведущей к его разрушению из-за образования этtringита или таумасита [12].

Соли магния могут вызывать магниезальную коррозию, приводящую к образованию рыхлых продуктов типа гидроксида магния и гипса. Хлориды, хотя и не разрушают непосредственно сам цементный камень (в отсутствие сульфатов), чрезвычайно опасны для стальной арматуры, если она присутствует в контакте с цементогрунтом (например, в железобетонных конструкциях или при армировании цементогрунтовых слоев).

Одним из серьезных механизмов разрушения укрепленных грунтов в засоленных средах, который часто недооценивается, является давление кристаллизации солей. При высыхании грунта или при циклах замораживания-оттаивания (когда вода превращается в лед, а соли концентрируются в незамерзшем рассоле) концентрация солей в поровом растворе возрастает. При достижении предела растворимости соли начинают кристаллизоваться в порах и микротрещинах материала. Рост кристаллов солей в стесненных условиях пор сопровождается значительным увеличением объема и развитием давления кристаллизации, которое может достигать десятков и даже сотен атмосфер. Это давление способно вызывать растрескивание и разрушение как цементного камня, так и полимерно-грунтовой матрицы, даже если сами материалы химически устойчивы к воздействию солей в растворенном виде. Например, кристаллизация мирабилита ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) при понижении температуры в сульфатных засоленных грунтах может вызывать значительное расширение и повреждение [21].

Для каждого конкретного типа грунта необходимо проводить комплекс лабораторных испытаний по подбору оптимального состава укрепляющей смеси (тип и дозировка вяжущего, тип и дозировка химических/полимерных добавок). Испытания должны включать не только определение стандартных прочностных характеристик, но и оценку долговечности в условиях,

максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации (морозостойкость, водостойкость, сопротивление агрессивным средам, если таковые ожидаются).

Для обеспечения надёжности и долговечности конструктивных слоёв оснований дорожных одежд необходимо проведение детального химического и минералогического анализа грунта с целью выявления потенциально агрессивных компонентов, таких как сульфаты, сульфиды (в том числе пирит), органические вещества (с указанием их природы и количественного содержания), активные глинистые минералы (особенно монтмориллонит), а также легкорастворимые соли. При наличии указанных агрессивных факторов (сульфаты, кислоты, соли, ультрафиолетовое излучение, биологическая активность) требуется применение вяжущих материалов, устойчивых к данным видам воздействия. В частности, рекомендуется использование сульфатостойких или низкоалюминатных цементов, обладающих повышенной коррозионной стойкостью в агрессивных средах [26–28].

При выборе добавок и проектировании состава необходимо учитывать температурный режим региона, вероятность и количество циклов замораживания-оттаивания, возможность воздействия антиобледенительных реагентов (для дорожных конструкций) и другие специфические условия эксплуатации [22–25].

Обеспечение качества укрепленного грунта возможно только при строгом входном контроле поступающих материалов, а также соблюдении регламентированной технологии производства работ. Применяемые вяжущие вещества и добавки должны соответствовать действующим нормативным требованиям.

Технология производства работ должна предусматривать точное дозирование всех компонентов, тщательное и равномерное их перемешивание, уплотнение смеси при оптимальной (или заданной проектной) влажности до требуемой плотности, а также создание необходимых условий для твердения и набора прочности укрепленного грунта (температурно-влажностный режим, защита от пересыхания или переувлажнения на начальных этапах).

В настоящее время установлено, что значительное число производителей добавок, применяемых для стабилизации и укрепления грунтов,

не проводят всесторонних исследований по оценке влияния своих продуктов на процессы набора прочности цемента. Отдельное внимание следует уделить фактам недобросовестного поведения некоторых производителей химических реагентов, используемых в дорожном строительстве, которые умышленно не раскрывают данные о возможном агрессивном воздействии компонентов добавок на свойства цементных систем.

Следует отметить, что подобные добавки, как правило, демонстрируют положительное влияние на физико-механические характеристики грунта, не содержащего цементного вяжущего. Однако при устройстве конструктивных слоёв оснований дорожных одежд применение цемента или иных неорганических вяжущих материалов является обязательным условием, регламентируемым нормативной документацией.

В последнее время наблюдается разрушение конструктивных слоев основания автомобильных дорог на основе различных видов грунтов, в том числе и техногенных (асфальтогранулобетонных смесей), с использованием специальных видов добавок, целью применения которых является повышение физико-механических характеристик. В связи с этим было принято решение провести исследование одной из таких добавок на примере построенного объекта, на котором были обнаружены при приемочных испытаниях дефекты конструктивного слоя.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проводились с использованием грунта на участке подъездной автомобильной дороги, обслуживающей куст газовых скважин Харасавэйского газоконденсатного месторождения.

На первом этапе экспериментальных работ были проведены исследования исходных характеристик грунта. По ГОСТ 25100-2020 грунт относится к классу дисперсных грунтов, а именно, к несвязным песчаным грунтам (пескам). По гранулометрическому составу грунт относится к пескам пылеватым. Максимальная плотность скелета грунта $1,82 \text{ г/см}^3$, при оптимальной влажности $8,7 \%$. По степени засоленности грунт является незасоленным. По ГОСТ 28622-2012 грунт относится к непучинистым грунтам. Оптимальная влажность при максимальной плотности песчаного грунта представлена на рисунке 1. Гранулометрический состав грунта представлен в таблице 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав исходного грунта

№ пробы	Остатки	Размеры отверстий сит, мм					Прошло через сито 0,1
		2,0	1,0	0,5	0,25	0,1	
1	Частные	0,00	0,02	0,24	0,49	63,73	35,52
	Полные	0,00	0,02	0,26	0,75	64,48	

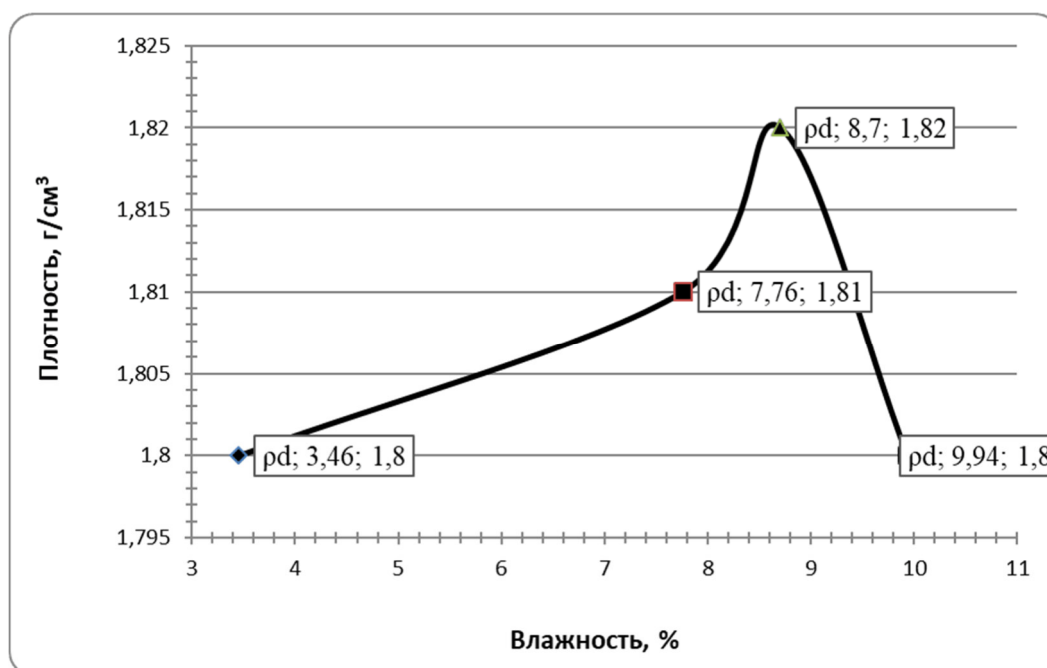


Рис. 1. Оптимальная влажность при максимальной плотности песчаного грунта

Производителем добавок является ООО «СнабКом» – отечественный разработчик и производитель комплексных полимерно-минеральных пластифицирующих противоморозных и гидрофобных добавочных смесей и гидрополимеров. Продукция производится в соответствии с СТО 95833406-01.0-2022 «Гидрополимер

POWER STAB для смесей с неорганическими вяжущими», СТО 95833406-02.0-2022 «Полимерно-минеральная добавка POWER STAB для смесей с неорганическими вяжущими».

Согласно проекту, расход цемента и комплексных добавок представлен в таблице 2 (из расчета на 1 м³ смеси), таблице 3 (из расчета на 1 м² смеси при толщине 0,30 м).

Таблица 2

Расход цемента и комплексных добавок (из расчета на 1 м³ смеси)

Потребность в цементе ЦЕМ I 32,5Н на 1 м³	Концентрированная минеральная смесь «POWER STAB» на 1 м³	Многокомпонентный гидрополимер «POWER STAB» на 1 м³
5 % от объемного веса грунта	3 % от объемного веса грунта	0,00015 % от объемного веса грунта или 0,3 % от объемного веса цемента
80,0 кг	48,0 кг	0,24 кг

Таблица 3

Расход цемента и комплексных добавок (из расчета на 1 м² смеси при толщине 0,30 м)

Потребность в цементе ЦЕМ I 32,5Н на 1 м²	Концентрированная минеральная смесь «POWER STAB» на 1 м²	Многокомпонентный гидрополимер «POWER STAB» на 1 м²
5 % от объемного веса грунта	3 % от объемного веса грунта	0,00015 % от объемного веса грунта или 0,3 % от объемного веса цемента
24,0 кг	14,4 кг	0,072 кг

В ходе экспериментальных исследований были подготовлены образцы укрепленного грунта с применением современных модифицирующих добавок: ГП POWER STAB, ПМД POWER STAB. Все работы проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 23558-94, регламентирующего технические условия на укрепленные грунты для дорожного строительства.

Для проведения комплексной оценки свойств модифицированных грунтов использовались стандартизированные методы испытаний:

ГОСТ 23558-94 – методы определения физико-механических характеристик грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими; ГОСТ 22733-2016 – определение плотности и влажности грунтов; ГОСТ 10180 – методы испытаний бетонов на прочность; ГОСТ 10060.1 – оценка морозостойкости строительных материалов; ГОСТ 30744-2001 – определение прочности цемента (активности).

Для оценки влияния комплекса добавок POWER STAB на физико-механические показатели укрепленного грунта были исследованы образцы песчаного грунта, укрепленные цементом с применением комплекса добавок POWER STAB различных составов, а также образцы,

укрепленные цементом в количестве 5 и 8 % без использования добавок. Физико-механические характеристики портландцемента класса ЦЕМ I 32,5Н производства ООО «ЦЕМРОС» представлены в таблице 4.

Таблица 4

Физико-механические характеристики портландцемента класса ЦЕМ I 32,5Н производства ООО «ЦЕМРОС»

Наименование показателя	Требование по ГОСТ 31108-2020	Фактический результат
Прочность на сжатие, МПа, в возрасте 2 суток	не нормируется	14,6
Прочность на сжатие, МПа, в возрасте 7 суток	не менее 16	22,1
Прочность на сжатие, МПа, в возрасте 28 суток	32,5–52,5	35,2
Начало схватывания, мин	не ранее 75	85
Равномерность изменения объема (расширение), мм	не более 10	3,1

Инфракрасная спектроскопия образца жидкого стабилизатора ГП POWER STAB выполнялась на FTIR-спектрометре (Bruker, серия Alpha), что позволило получить данные о фазовом составе добавки. Для детального анализа микроструктурных особенностей цементного камня с применением комплекса добавок POWER STAB и без них использовали сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

Основная часть. Основанием для проведения исследования по оценке эффективности применения многокомпонентного гидрополимера и концентрированной минеральной смеси POWER STAB при стабилизации и укреплении грунтов послужили образцы грунта с объекта строительства, а именно, подъездной автомобильной дороги к кусту газовых скважин Харасавэйского ГКМ.

В соответствии с проектом для автомобильных дорог категории IV-в с повышенными деформационно-прочностными характеристиками при строительстве было необходимо выполнить устройство стабилизированного и укрепленного слоя грунтобетонного по критерию требуемого показателя прочности переходного покрытия не ниже М60 и марки по морозостойкости F50 по ГОСТ 23558-94 при заданном уровне надежности, толщиной 0,30 м из смеси, состоящей из химически закрепленных грунтов комплексной полимерно-минеральной пластифицирующей противоморозной добавочной смесью и многокомпонентным гидрополимером марки «POWER STAB», с устройством защитного водонепроницаемого слоя полимерной защитной дорожной композицией марки «Power Protect».

Отбор образцов укрепленного грунта из устроенного конструктивного слоя автомобильной дороги для определения прочностных харак-

теристик производился при отрицательной температуре с использованием фрезы. При этом отобранный материал представлял собой цельный кусок уплотненного материала и находился в замороженном виде. После оттаивания, представленные образцы с объекта строительства представляли собой рыхлую несвязанную массу и не могли быть отнесены к укрепленному грунту (рис. 2).

В связи с выявленным несоответствием физико-механических характеристик уложенного конструктивного слоя грунта, укрепленного цементом в сочетании с многокомпонентным гидрополимером и концентрированной минеральной смесью POWER STAB проектным требованиям, были проведены лабораторные исследования различных составов грунта с применением указанных добавок с целью получения объективной оценки причин отклонений.

В таблице 5 представлены составы исследуемых образцов грунта, стабилизированных комплексом добавок POWER STAB, где в качестве контрольных образцов представлены составы с содержанием портландцемента 5% и 8% от массы грунта без дополнительных модификаторов. Экспериментальные составы включают три основных компонента: портландцемент в качестве основного вяжущего (содержание варьируется от 5% до 18% от массы грунта), жидкий стабилизатор ГП POWER STAB, вводимый в количестве 0,3% от массы цемента, и порошкообразный модификатор ПМД POWER STAB, добавляемый в количестве 3% от массы грунта. Такая компоновка составов позволяет провести комплексное исследование влияния добавок POWER STAB на физико-механические характеристики грунтобетона, а также оценить их эффективность при стабилизации и укреплении грунта на объекте строительства



Рис. 2. Фотографии отобранных образцов после вскрытия с объекта строительства

Результаты прочностных характеристик укрепленных грунтов исследуемых составов продемонстрированы на рисунке 3. Анализ полученных результатов показал, что введение комплекса добавок POWER STAB при 5 % содержании цемента (состав 1) привело к снижению прочностных показателей на 15,2 % при сжатии и 28,4 % при изгибе по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует об отрицательном влиянии добавок на свойства грунтобетона. При этом марка по прочности образцов проектного состава соответствует M20. Таким образом, достигнуть необходимые прочностные показатели укрепляемого грунта согласно проекту с расходом цемента 5 % и комплекса добавок (многокомпонентного гидрополимера и концентриро-

ванной минеральной смеси POWER STAB), в соответствии с таблицей 2, не представляется возможным.

Дальнейшее увеличение содержания цемента (составы 2–7) в составах укрепляемого грунта было обосновано необходимостью достижения прочностных характеристик конструктивного слоя грунта на объекте строительства по проекту значениям марки по прочности M60 и по морозостойкости – F50.

Контрольные образцы показали ожидаемый рост прочности с увеличением содержания цемента: при повышении дозировки с 5 % до 8 % прочность на сжатие увеличилась с 2,43 МПа до 3,84 МПа (на 58 %), а на изгиб – с 0,74 МПа до 1,10 МПа (на 48 %). При увеличении содержания цемента до 8 % (состав 2) негативное влияние до-

бавок значительно уменьшилось: падение прочности на сжатие составило 1,3 %, на изгиб – 4,5 %. Однако образцы состава 3 (8 % цемента с жидким стабилизатором) показали более значительное падение прочностных характеристик (на 31 и 26%, соответственно, предел прочности при сжатии и при изгибе) по сравнению с составом 2, в

котором дополнительно присутствует порошок ПМД POWER STAB, что свидетельствует о том, что именно ГП POWER STAB оказывает наиболее негативное влияние на процесс набора прочности грунта, укрепленного цементом.

Таблица 5

Составы образцов укрепленного грунта

Наименование состава	Цемент, % от массы грунта	ГП POWER STAB, % от массы цемента	ПМД POWER STAB, % от массы грунта
Контроль (5 %)	5	–	–
1 состав (проектный состав)	5	0,3	3
Контроль (8 %)	8	–	–
2 состав	8	0,3	3
3 состав	8	0,3	–
4 состав	10	0,3	–
5 состав	12	0,3	–
6 состав	12	0,3	3
7 состав	18	0,3	3

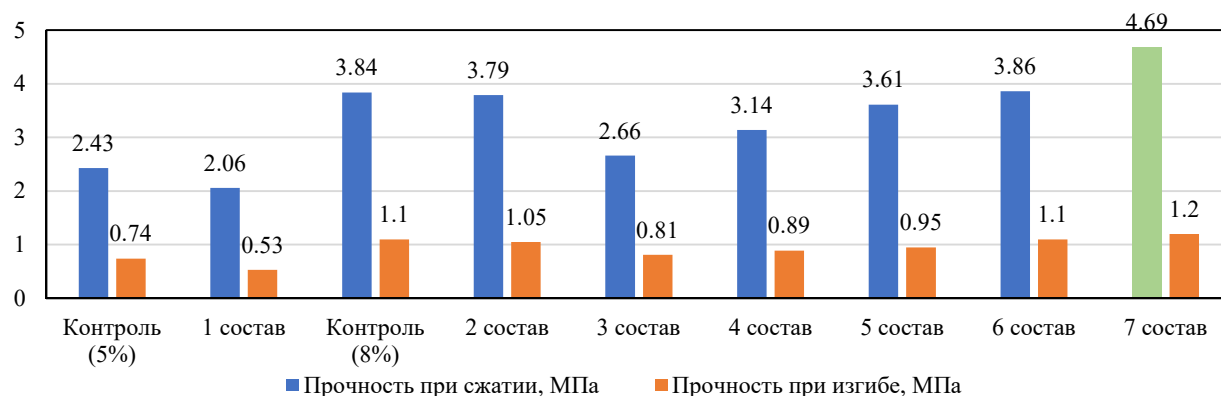


Рис. 3. Результаты прочностных характеристик укрепленных грунтов

Устойчивый рост прочностных характеристик наблюдается при значительном увеличении цемента по сравнению с проектным составом. Причем лишь при введении 12 % цемента с полным комплексом добавок в состав укрепляемого грунта (состав 6) удалось достигнуть показателей контрольного образца с 8 % цемента. Наибольшие значения прочности (4,69 МПа при сжатии и 1,20 МПа при изгибе) показал состав 7 с содержанием вяжущего, равным 18 %, что позволило отнести образцы по прочности к более высокой марке М40. Достигнуть проектную марку по прочности не удалось и при 18% цемента в комплексе с добавками POWER STAB.

Дальнейшие экспериментальные исследования были направлены на изучение влияния добавок POWER STAB на морозостойкость укрепляемого грунта. Согласно проекту, необходимая марка по морозостойкости должна быть не ниже марки F50.

Результаты испытаний образцов различных составов на морозостойкость показали (табл. 6 –

фактические значения показателя морозостойкости, рис. 4 – изменение данного показателя), что все исследованные составы за исключением контрольного состава с 5 % цемента, а также составы 3, 6 и 7 соответствуют марке по морозостойкости F15. Потеря прочности при сжатии образцов состава 3 (8 % цемента и 0,3 % ГП POWER STAB) после 15 циклов замораживания-оттаивания составила 45,11%, то есть больше контрольного состава с 8% цемента. Также низкую стабильность при замораживании-оттаивании демонстрируют образцы составов 4 и 5 с повышенным содержанием цемента (10 и 12 %, соответственно) в комплексе с жидким стабилизатором ГП POWER STAB без минерального стабилизатора ПМД POWER STAB.

Исходя из этого можно сделать вывод, что жидкий стабилизатор ГП POWER STAB оказывает негативное влияние на показатель морозостойкости укрепленного грунта.

Стоит обратить внимание, что образец контрольного состава с 5 % цемента показал

наибольшую морозостойкость (марка F25). Образец с 5 % цемента теряет всего 4,9 % прочности после 15 циклов и 19,75 % – после 25 циклов. При увеличении количества циклов замораживания-оттаивания до 50 деградация ускоряется, достигая 58,9 %. Образцы составов 6 и 7 также соответствуют марке по морозостойкости F25 (потеря прочности составила менее 25 %). В частности, состав 7 (18% цемента, 0,3 % ГП POWER STAB и 3 % ПМД POWER STAB) после 15 циклов сохранил 82,1 % прочности (снижение до 3,85 МПа), после 25 циклов – 75,7 % (3,55 МПа), а после 50 циклов – 52,2 % (2,45 МПа). Аналогичную динамику показывает состав 6 (12 % цемента, 0,3 % ГП POWER STAB и 3 % ПМД POWER STAB), где потери прочности составили 19,2 % (F15), 23,6 % (F25) и 48,2 % (F50).

Исходя из этого можно сделать вывод, что комплекс добавок POWER STAB не обеспечил получение образцов укрепленного грунта проектной морозостойкости, равной F50. Согласно исследованиям, проектный состав 1 с минимальным количеством цемента 5 % и комплексом добавок POWER STAB показал морозостойкость

менее 15 циклов замораживания-оттаивания. При этом увеличение количества цемента до 18 % также не способствовало доведению образцов укрепленного грунта с комплексом добавок POWER STAB до марки по морозостойкости F50 (марка не превысила значения F25). Применение комплекса добавок проявляет лишь отрицательный эффект на показатель морозостойкости укрепляемого грунта.

Таблица 6

Фактические значения показателя морозостойкости

№/результат	F15, МПа	F25, МПа	F50, МПа
Контроль (5%)	2,31	1,95	1,00
1 состав	1,76	1,43	1,23
Контроль (8%)	3,15	2,10	1,85
2 состав	2,92	1,70	1,25
3 состав	1,46	1,23	1,15
4 состав	2,50	1,95	1,25
5 состав	2,85	2,15	1,55
6 состав	3,12	2,95	2,00
7 состав	3,85	3,55	2,45

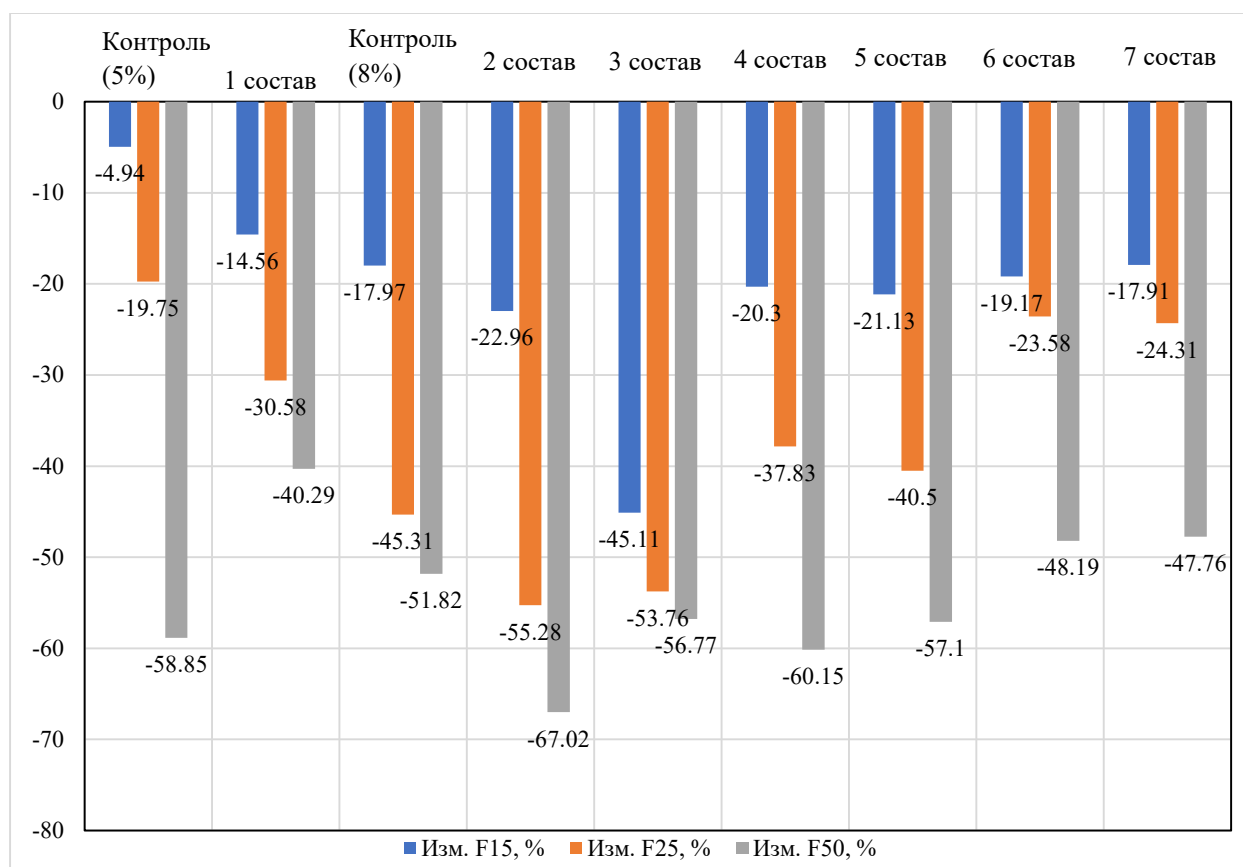


Рис. 4. Изменение прочности образцов при испытании на морозостойкость

Для определения причин снижения прочностных характеристик грунтов при введении комплекса добавок POWER STAB, было прове-

дено исследование активности цементно-песчаных образцов с использованием добавок и без них, составы которых представлены в таблице 7.

Таблица 7

Составы цементно-песчаных образцов

Наименование состава	Наименование компонента и его количество			
	Песок	Цемент	ПМД POWER STAB	ГП POWER STAB
Контроль	300 %	100 %	—	—
1 состав			3 % от массы цемента	—
2 состав			—	0,3 % от массы цемента

Предел прочности при сжатии исследованных цементно-песчаных образцов представлен

на рисунке 5, сравнительный анализ – в таблице 8.

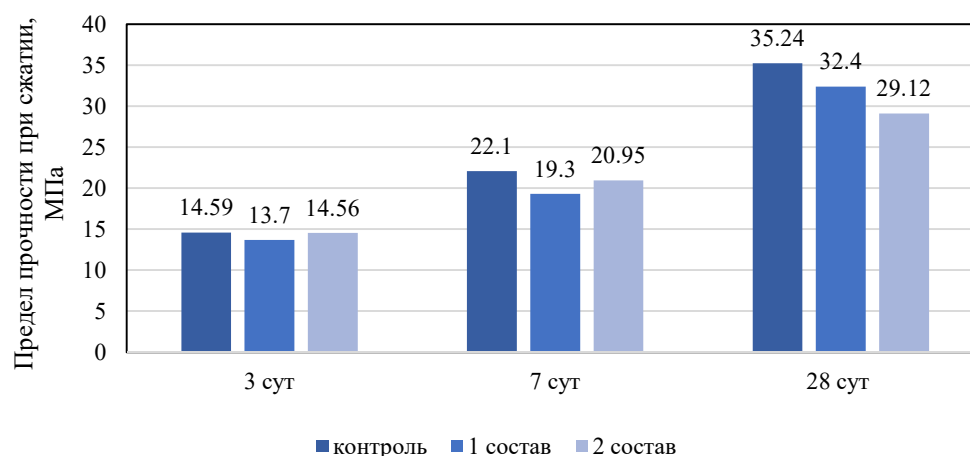


Рис. 5. Предел прочности при сжатии исследованных цементно-песчаных образцов

Таблица 8

Сравнительная оценка прочностных характеристик составов 1 и 2 относительно контрольного образца

Наименование состава	Изменение прочности, %		
	3 сут	7 сут	28 сут
Состав 1	-6,1	-12,7	-8,1
Состав 2	-0,2	-5,2	-17,4

Результаты испытаний показали, что введение добавки ПМД POWER STAB в количестве 3 % от массы вяжущего (состав 1) привело к заметному снижению прочностных характеристик цементно-песчаных образцов уже на ранних стадиях твердения. На 3 суток эксперимента было зафиксировано снижение прочности на 6,1 % по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует о негативном влиянии данной добавки на процессы структурообразования. В дальнейшем это влияние усиливалось. Так, к 7 суткам снижение прочности образцов достигло 12,7 %, а к концу периода наблюдений составило 8,1 %.

Образцы состава 2, содержащие жидкий стабилизатор ГП POWER STAB в количестве 0,3 % от массы цемента, показали несколько иную картину изменения прочностных характеристик. На начальной стадии твердения (3 суток) наблюдалось лишь незначительное снижение прочности

образцов на 0,2 %. Однако к 7 суткам это снижение усилилось до 5,2 %. Наиболее существенное ухудшение прочностных показателей было зафиксировано в конце экспериментального периода, когда разница с контрольным образцом составила 17,4 %. Такая динамика изменения прочности свидетельствует о том, что жидкий стабилизатор, хотя и не оказывает существенного влияния на ранних стадиях твердения, в долгосрочной перспективе приводит к значительному снижению прочностных характеристик цемента.

На основании полученных физико-механических показателей была предпринята попытка определить причину отрицательного влияния жидкого стабилизатора ГП POWER STAB на свойства укрепленного грунта путем исследования структуры цементного камня, в состав которого была введена данная добавка. Также был исследован высушенный образец ГП POWER STAB с помощью ИК-спектроскопии.

Анализ цементной структуры с использованием ГП POWER STAB и без нее с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU показал, что применение жидкого стабилизатора приводит к локальным структурным повреждениям цементного камня без масштабного трещинообразования, но с признаками расслоения и потери плотности в отдельных участках (рис. 6).

На представленном снимке изображён фрагмент цементного камня с признаками локального разрушения. Поверхность имеет характерную серую зернистую структуру, типичную для затвердевшего цементного камня, с выраженным рельефом, свидетельствующим о наличии минеральных включений и неоднородном уплотнении.

В центре изображения заметна дефектная зона – глубокая полость неправильной формы, образовавшаяся в результате потери части цементной матрицы и осыпания мелких зерен заполнителя. По краям полости видны обнажённые частицы песка и мелкого щебня, частично освободившиеся из цементного геля. В нижней части и по бокам от неё присутствуют микропустоты и небольшие сколы, создающие ощущение постепенной деградации материала. Такой тип повреждения может быть ранним признаком потери долговечности бетонной конструкции и требует

локального ремонта или последующего наблюдения.

Для сравнения также была проведена оценка структуры цементно-песчаных образцов контрольного состава (рис. 7). Представленный фрагмент поверхности цементного камня контрольного состава под макросъёмкой имеет классический серый цвет, а по всей поверхности равномерно распределены мелкие поры. Отсутствуют крупные пустоты и трещины, что указывает на высокую плотность и однородность структуры. В цементном камне случайные воздушные включения минимальны, а поровое пространство, главным образом, состоит из мелких капиллярных пор и внутрисгелевых пустот. Эти поры распределены достаточно равномерно по объёму материала, что видно на изображении – поверхность имеет однородную мелкопористую текстуру без скоплений или крупных разрывов.

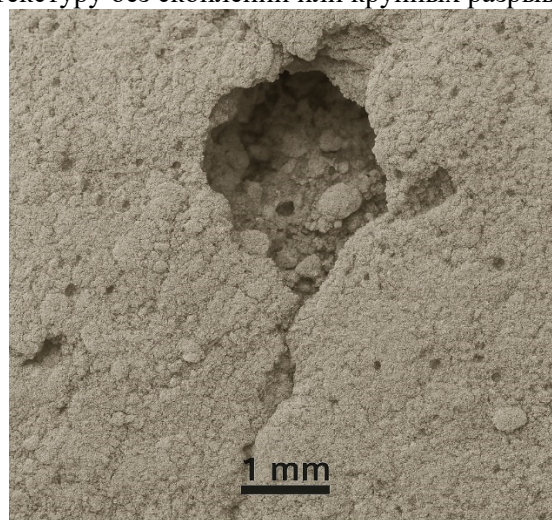
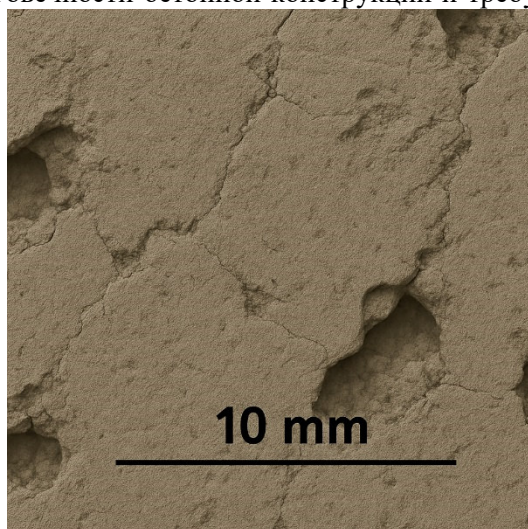


Рис. 6. Фрагмент цементного камня с использованием ГП POWER STAB

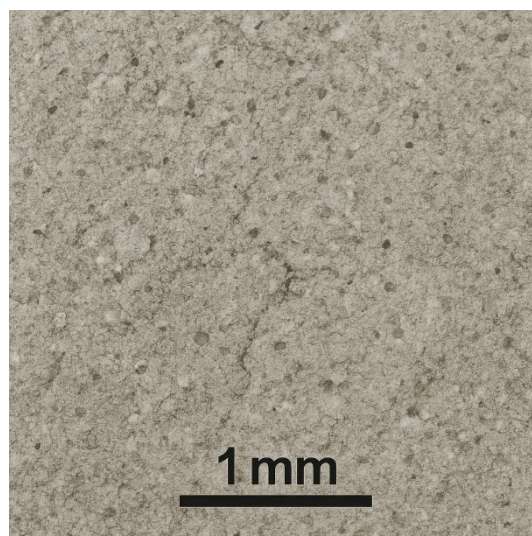
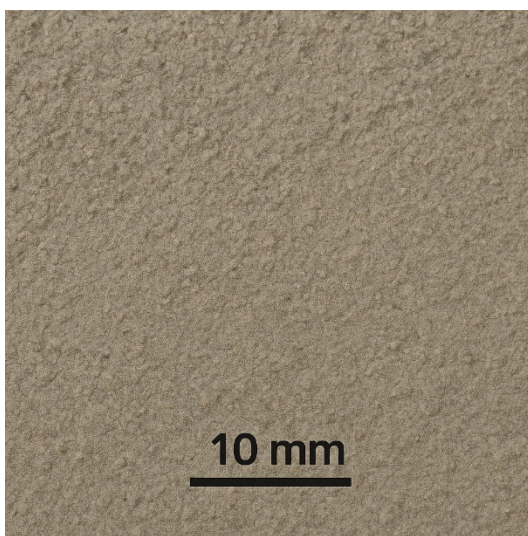


Рис. 7. Фрагмент цементного камня контрольного состава

ИК-спектроскопия (инфракрасная спектроскопия в области средних частот ($4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$))

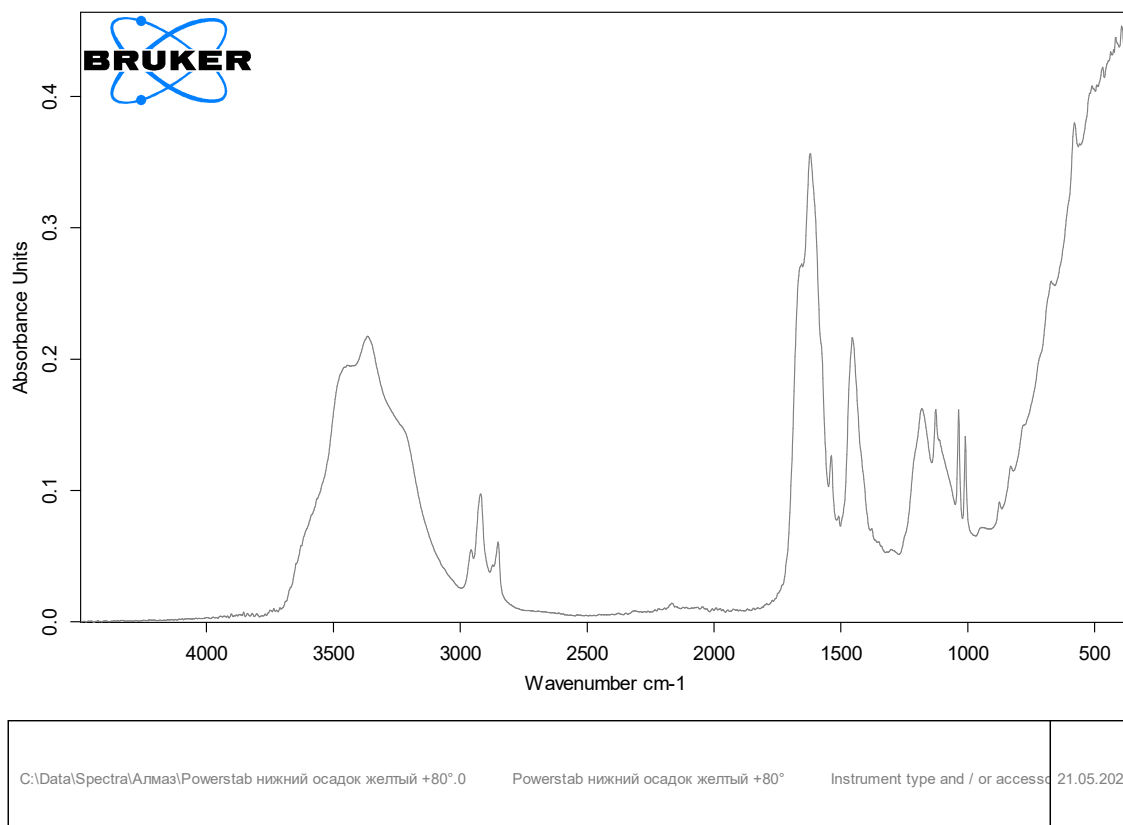
сухого остатка ГП POWER STAB показала (рис.8) следующее:

1. широкую область $\sim 2850\text{--}2950\text{ см}^{-1}$, что соответствует алкильным цепям;
2. выраженную область $\sim 1000\text{--}1200\text{ см}^{-1}$, что свидетельствует сигналам SO_3^- ;
3. наличие сигнала в области $\sim 1500\text{--}1600\text{ см}^{-1}$, что может относиться к химической связи $\text{C}=\text{C}$;
4. отсутствие характерного пика $\text{C}=\text{O}$ ($\sim 1700\text{ см}^{-1}$), что подтверждает отсутствие эфиров, кетонов и полиэфиров.

На основании спектроскопических данных с высокой степенью достоверности установлено,

что исследуемый образец (твёрдый остаток жёлтого цвета после высушивания) содержит следующие функциональные группы:

- алкильные цепи (длинноцепочечные углеводороды);
- ароматическое бензольное кольцо;
- сульфонатная группа ($-\text{SO}_3^-$), что характерно для алкилбензолсульфонатов, в частности сульфанола (технического алкилбензолсульфоната натрия).



Page 1 of 1

Рис. 8. Инфракрасная спектроскопия образцов добавки POWER STAB

Таким образом, исследуемое вещество, осадок из состава POWER STAB, представляет собой алкилбензолсульфонат натрия (торгово-техническое наименование: сульфанол) – типичное поверхностно-активное вещество анионного типа, не обладающее полимерной структурой. Допускается присутствие незначительных примесей, типичных для технических марок.

При этом стоит обратить внимание, что исследуемый образец не обладает полимерной структурой, о которой было заявлено производителем добавок серии POWER STAB.

Сульфанол, являющийся основой добавки ГП POWER STAB, как поверхностно-активное вещество, может:

- повлиять на смачиваемость частиц и диспергирование компонентов при укреплении и стабилизации грунтов;

- потенциально нарушить процессы гидратации цемента, ингибируя образование прочной кристаллической структуры;

- повысить пенообразование в смеси, что приводит к пористости и снижению прочности укрепляемого грунта.

Выводы. На основании проведенных исследований по оценке эффективности применения многокомпонентного гидрополимера и концентрированной минеральной смеси POWER STAB при стабилизации и укреплении грунтов установлено, что введение комплекса добавок POWER STAB приводит к снижению прочностных показателей образцов укрепленного грунта по сравнению с контрольными образцами без использования модификаторов.

Достигнуть необходимые физико-механические показатели укрепляемого грунта согласно

проекту с расходом цемента 5 % и комплекса добавок (многокомпонентного гидрополимера и концентрированной минеральной смеси POWER STAB) не представляется возможным, что подтверждается отрицательным влиянием добавок на свойства грунтобетона. При этом марка по прочности образцов проектного состава соответствует M20 (требуемая марка должна соответствовать M60). Жидкий стабилизатор ГП POWER STAB оказывает негативное влияние на показатель морозостойкости укрепленного грунта. Морозостойкость укрепленного грунта с использованием комплекса добавок POWER STAB в соответствии с проектным составом составила F15 (требуемая марка должна соответствовать F50). Стоит отметить, что образцы состава с 8% цемента и жидким стабилизатором ГП POWER STAB в количестве 0,3% не достигли марки по морозостойкости F15.

Исследование активности цемента с применением комплекса добавок POWER STAB показали, что жидкий стабилизатор, хотя и не оказывает существенного влияния на ранних стадиях твердения цементно-песчаных образцов, в долгосрочной перспективе приводит к значительному снижению прочностных характеристик цемента.

Анализ цементной структуры с использованием добавок POWER STAB и без них показал, что применение ГП POWER STAB приводит к локальным структурным повреждениям цементного камня без масштабного трещинообразования, но с признаками расслоения и потери плотности в отдельных участках.

Стоит обратить внимание, что исследуемый образец ГП POWER STAB не обладает полимерной структурой, о которой было заявлено производителем добавок серии POWER STAB. Исследуемое вещество, осадок из состава ГП POWER STAB, представляет собой алкилбензолсульфонат натрия (торгово-техническое наименование: сульфанол) – типичное поверхностно-активное вещество анионного типа, не обладающее полимерной структурой. Данное вещество может нарушить процессы гидратации цемента, ингибируя образование прочной кристаллической структуры.

Таким образом, полученные результаты указывают на нецелесообразность введения добавок POWER STAB и необходимости тщательного подбора составов для достижения необходимых физико-механических характеристик укрепленного грунта согласно проектным данным на объекте строительства, в частности, на участке подъездной автомобильной дороги, обслуживающей куст газовых скважин Харасавэйского газоконденсатного месторождения. Предотвращение

ухудшения набора прочности укрепленных грунтов требует комплексного подхода, основанного на глубоком знании свойств используемых материалов, механизмов их взаимодействия и влияния внешних факторов. Только такой подход позволит обеспечить получение долговечного и надежного материала, соответствующего проектным требованиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стабилизация грунта – устройство основания // MBM: [сайт]. URL: <https://mbmfloor.ru/services/stabilizatsiia-grunta-ustroistvo-osnovaniia/> (дата обращения: 10.05.2025).
2. Клековкина М. П. Инновационные материалы – добавки и стабилизаторы для укрепления грунтов // Техника. Технологии. Инженерия. 2017. № 3 (5). С. 31–34.
3. Ядыкина В.В., Лукаш Е.А., Кондрашов Д.С. Влияние стабилизирующих добавок на свойства укрепленных портландцементом грунтов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №. 11. С. 6–10. DOI: 10.12737/article_5a001aaaee4b3.57860955.
4. Chen S. Optimal Utilization of Biochar, Polyacrylamide, and Straw Fiber for Subgrade Stabilization of Forest Roads // Forests. 2024. Vol. 15. No. 12. 2079. DOI:10.3390/f15122079.
5. Liu W. Study on the Corrosion Behavior of Cemented Organic Soil in Dianchi Lake // Materials. 2023. Vol. 16. No. 17. 5951. DOI: 10.3390/ma16175951.
6. Gao H. Effect of humus on the solidification and stabilization of heavy metal contaminated river sediment // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20. No. 6. 4882. DOI: 10.3390/ijerph20064882.
7. Прокопьева Д. П., Руденко Б. Д. Влияние добавок на прочность цементного раствора, затворенного экстрактами хвойных пород // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. №. 34. С. 74–77.
8. Ghasemzadeh H., Mehrpajouh A., Pishvaei M. Compressive strength of acrylic polymer-stabilized kaolinite clay modified with different additives // ACS omega. 2022. Vol. 7. No. 23. Pp. 19204–19215. DOI:10.1021/acsomega.2c00236.
9. Еремко Е.А. Ускорители схватывания и твердения в технологии бетонов // Материалы XIII Международной молодежной научной конференции "Севергеозкотех-2012" (28-30 ноября 2012 г.). Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2013. Т. 5. С. 104-108.

10. Dash S.K., Hussain M. Lime stabilization of soils: reappraisal // Journal of materials in civil engineering. 2012. Vol. 24. No 6. Pp. 707–714. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000431.
11. Soltaninejad S., Marandi S.M., BP N. Effects of the Types and Amounts of Clay Minerals on Durability of Lime-Stabilized Clay Soils // Minerals. 2023. Vol. 13. No. 10. 1317. DOI: 10.3390/min13101317.
12. Цементно-глиняно-известковый раствор. Состав, характеристики. // Земт: [сайт]. URL: <https://xn--eladqy.xn--plai/garcovka/> (дата обращения: 10.05.2025).
13. Козлова В.К., Вольф А.В. Анализ причин позднего появления этtringита в цементном камне // Ползуновский вестник. 2009. №. 3. С. 176–180.
14. Liao X. Deterioration and oxidation characteristics of black shale under immersion and its impact on the strength of concrete // Materials. 2020. Vol. 13. No. 11. 2515. DOI: 10.3390/ma13112515.
15. Самедов А. М., Ткач Д. В. Укрепление переувлажненных глинистых грунтов молотой негашеной известью или жженой магнезией // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2012. №. 2. С. 163–171.
16. Yunus N.Z.M. A short review of the factors influencing lime-clay reactions // Electron. J. Geotech. Eng. 2014. Vol. 19. Pp. 6269–6282.
17. Деструкция полимеров. Химический анализ // Лаборатория. Экологический мониторинг: [сайт]. URL: <https://www.chemanalytica.ru/destrukciya-polimerov> (дата обращения: 10.05.2025).
18. Полимерные материалы: влияние условий эксплуатации на прочность полимеров // PLASTINFO: [сайт]. URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/112/> (дата обращения: 10.05.2025).
19. Полимеры и температура - горячая взаимосвязь // NETZSCH Analyzing & Testing: [сайт]. URL: <https://analyzing-testing.netzsch.com/ru/application-literature/polimery-i-temperatura-goriachaia-vzaimosviaz> (дата обращения: 10.05.2025).
20. Li S. Research on Solidification Methods and Stabilization Mechanisms of Sulfate Saline Soils // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. No. 16. 7246. DOI: 10.3390/app14167246.
21. Фомина Ю.С. Семкина А.С. Биосовместимые гидрогели на основе биоразлагаемых полиэфиров и их сополимеров // Коллоидный журнал. 2023. Т. 85. № 5. С. 682–704. DOI: 10.31857/S0023291223600554.
22. Xia W. Characterization and Mechanism Analysis of Hydrophobic Polymer-Modified Saline Soil // Journal of Materials in Civil Engineering. 2025. Vol. 37. No. 3. 04024542. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-18319.
23. Гидрофобизатор: что это, характеристики, свойства // Sil-ex: [сайт]. URL: <https://sil-ex.ru/manual/gidrofobizatory-vidy-naznachenie-harakteristiki-gde-primenyajut/> (дата обращения: 10.05.2025).
24. Goldberg S., Glaubig R. A. Effect of saturating cation, pH, and aluminum and iron oxide on the flocculation of kaolinite and montmorillonite // Clays and clay minerals. 1987. Vol. 35. No. 3. Pp. 220–227.
25. Wang L. A state-of-the-art review of organic polymer modifiers for slope eco-engineering // Polymers. 2023. Vol. 15. No. 13. 2878. DOI: 10.3390/polym15132878.
26. Применение инновационных технологий при строительстве автомобильных дорог из укрепленных грунтов (опыт Нижегородской области) // Государственное казенное учреждение Нижегородской области «Главное Управление Автомобильных Дорог»: [сайт]. URL: <https://www.guad.nnov.ru/otrasl/tekhnologii/primenenie-innovatsionnykh-tekhnologiy-pri-stroitelstve-avtomobilnykh-dorog-iz-ukrepyennykh-gruntov/> (дата обращения: 10.05.2025).
27. Инженерные методы преобразования строительных свойств оснований (грунтов), дата последнего обращения // Бур-шнек: [сайт]. URL: <http://бур-шнек.рф/инженерные-методы-преобразования-ст/> (дата обращения: 10.05.2025).
28. Гидрофобизаторы: применение, принцип действия, виды // Эттрилат: [сайт]. URL: <https://www.ettrilat.ru/articles/i34.html> (дата обращения: 10.05.2025).

Информация об авторах

Траутвайн Анна Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина. E-mail: trautvain@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кожевина Алина Александровна, студент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина. E-mail: syryhalina@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 23.07.2025 г.

© Траутвайн А.И., Кожевина А.А., 2026

Trautvain A.I., *Kozhevina A.A.*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov***E-mail:syryhalina@gmail.com*

MECHANISMS AND FACTORS THAT WORSEN THE STRENGTH GAIN OF SOIL STABILIZED WITH CHEMICAL ADDITIVES USING THE EXAMPLE OF A MULTICOMPONENT HYDROPOLYMER AND A CONCENTRATED MINERAL MIXTURE OF POWER STAB

Abstract. *The article evaluates the effectiveness of using a multicomponent hydropolymer and a concentrated mineral mixture of POWER STAB in stabilizing and strengthening soils using soil samples from the construction site, namely the access road to the cluster of gas wells of the Kharasaveysky gas field.*

It was found that the maintenance of a complex of POWER STAB additives leads to a decrease in the strength parameters of reinforced soil samples compared with control samples without the use of modifiers. It is not possible to achieve the necessary physical and mechanical parameters of the reinforced soil according to the project with a cement consumption of 5 % and a complex of additives (multicomponent hydropolymer and concentrated mineral mixture POWER STAB). At the same time, the strength grade of the samples of the design composition corresponds to M20 (the required grade must correspond to M60). The liquid stabilizer GP POWER STAB has a negative effect on the frost resistance of the reinforced soil. The frost resistance of the reinforced soil using the POWER STAB additive complex in accordance with the design composition was F15 (the required grade must correspond to F50).

Based on the obtained physico-mechanical parameters, an attempt was made to determine the cause of the negative effect of POWER STAB additives on the properties of reinforced soil by examining the strength and structure of the cement stone into which these additives were introduced. A dried sample of the GP POWER STAB was also examined using IR spectroscopy.

Keywords: *stabilization, soil strengthening, POWER STAB additives, physico-mechanical properties, cement activity, IR spectroscopy.*

REFERENCES

1. Soil stabilization – base construction [Stabilizatsiia grunta – ustroistvo osnovaniia]. MBM: [website]. URL: <https://mbmfloor.ru/services/stabilizatsiia-grunta-ustroistvo-osnovaniia/> (date of application: 10/05/2025). (rus)
2. Klekovkina M.P. InNovative materials – additives and stabilizers for soil reinforcement [InNovatsionnye materialy – dobavki i stabilizatory dlya ukrepleniya gruntov]. Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya, 2017. No. 3(5). Pp. 31–34. (rus)
3. Yadykina V.V., Lukash E.A., Kondrashov D.S. Influence of stabilizing additives on properties of Portland cement reinforced soils [Vliyanie stabiliziruyushchikh dobavok na svoystva ukreplennykh portlandtsementom gruntov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 11. Pp. 6–10. (rus)
4. Chen S. Optimal Utilization of Biochar, Polyacrylamide, and Straw Fiber for Subgrade Stabilization of Forest Roads. Forests. 2024. vol. 15. No. 12. 2079. DOI:10.3390/f15122079.
5. Liu W. Study on the Corrosion Behavior of Cemented Organic Soil in Dianchi Lake. Materials. 2023. Vol. 16. No. 17. 5951. DOI: 10.3390/ma16175951.
6. Gao H. Effect of humus on the solidification and stabilization of heavy metal contaminated river sediment. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20. No. 6. 4882. DOI: 10.3390/ijerph20064882.
7. Prokopieva D.P., Rudenko B.D. Influence of additives on strength of cement mortar mixed with coniferous extracts [Vliyanie dobavok na prochnost tsementnogo rastvora, zatvorenogo ekstraktami khvoynykh porod]. Aktualnye problemy lesnogo kompleksa. 2012. No. 34. Pp. 74–77. (rus)
8. Ghasemzadeh H., Mehrpajouh A., Pishvaei M. Compressive strength of acrylic polymer-stabilized kaolinite clay modified with different additives. ACS Omega. 2022. Vol. 7. No. 23. Pp. 19204–19215. DOI:10.1021/acsomega.2c00236.
9. Eremko E.A. Accelerators of setting and hardening in concrete technology [Uskoriteli skhvatyvaniya i tverdeniya v tekhnologii betonov] Materialy XIII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Severgeokotekh-2012" (28-30 noyabrya 2012). Ukhta: Ukhtinskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2013. Vol. 5. Pp. 104–108. (rus)

10. Dash S.K., Hussain M. Lime stabilization of soils: reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 24. No. 6. Pp. 707–714. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000431.
11. Soltaninejad S., Marandi S.M., BP N. Effects of the Types and Amounts of Clay Minerals on Durability of Lime-Stabilized Clay Soils. *Mineral*. 2023. Vol. 13. No. 10. 1317. DOI: 10.3390/min13101317.
12. Cement-clay-lime mortar. Composition, characteristics [TsementNo-glinyaNo-izvestkovy rastvor. Sostav, kharakteristiki]. Zem-t : [website]. URL: <https://xn--eladqy.xn--p1ai/garcovka/> (date of application: 10/05/2025). (rus)
13. Kozlova V.K., Volf A.V. Analysis of causes of late ettringite formation in cement stone [Analiz prichin pozdnego poyavleniya ettringita v tsement-Nom kamne]. *PolzuNovsky vestnik*. 2009. No. 3. Pp. 176–180. (rus)
14. Liao X. Deterioration and oxidation characteristics of black shale under immersion and its impact on the strength of concrete. *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 11. 2515. DOI: 10.3390/ma13112515.
15. Samedov A.M., Tkach D.V. Reinforcement of waterlogged clay soils with ground quicklime or burnt magnesite [Ukreplenie pereuvlazhennyykh glinistykh gruntov molotoy negasheNoy izvestyu ili zhzhheNoy magneziey]. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvenNogo universiteta. Nauki o zemle*. 2012. No. 2. Pp. 163–171. (rus)
16. Yunus N.Z.M. A short review of the factors influencing lime-clay reactions. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2014. Vol. 19. Pp. 6269–6282.
17. Polymer destruction. Chemical analysis [Destruktsiya polimerov. Khimichesky analiz]. Laboratoriya. Ekologichesky monitoring: [website]. URL: <https://www.chemanalytica.ru/destrukciya-polimerov> (date of application: 10/05/2025). (rus)
18. Polymeric materials: influence of operating conditions on polymer strength [Polimernye materialy: vliyaniye usloviy ekspluatatsii na prochNost polimerov]. PLASTINFO: [website]. URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/112/> (date of application: 10/05/2025). (rus)
19. Polymers and temperature - hot relationship [Polimery i temperatura - goryachaya vzaimosvyaz]. NETZSCH Analyzing & Testing: [website]. URL: <https://analyzing-testing.netzsch.com/ru/application-literature/polimery-i-temperatura-goriachaia-vzaimosviaz> (date of application: 10/05/2025).
20. Li S. Research on Solidification Methods and Stabilization Mechanisms of Sulfate Saline Soils. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 16. 7246. DOI: 10.3390/app14167246.
21. Fomina Yu.S., Semkina A.S. Biocompatible hydrogels based on biodegradable polyesters and their copolymers [Biosovmestimye gidrogeli na osNove biorazlagaemykh poliefirov i ikh sopolimerov]. *Kolloidny zhurnal*. 2023. Vol. 85. No. 5. Pp. 682–704. DOI: 10.31857/S0023291223600554.
22. Xia W. Characterization and Mechanism Analysis of Hydrophobic Polymer-Modified Saline Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2025. Vol. 37. No. 3. 04024542. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-18319.
23. Hydrophobizer: what is it, characteristics, properties [Gidrofobizator: chto eto, kharakteristiki, svoystva]. Sil-ex: [website]. URL: <https://sil-ex.ru/manual/gidrofobizatory-vidy-naznachenie-kharakteristiki-gde-primenyajut/> (date of application: 10/05/2025). (rus)
24. Goldberg S., Glaubig R.A. Effect of saturating cation, pH, and aluminum and iron oxide on the flocculation of kaolinite and montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*. 1987. Vol. 35. No. 3. Pp. 220–227.
25. Wang L. A state-of-the-art review of organic polymer modifiers for slope eco-engineering. *Polymers*, 2023. Vol. 15. No. 13. 2878. DOI: 10.3390/polym15132878.
26. Application of innovative technologies in construction of highways from reinforced soils (experience of Nizhny Novgorod region) [Primenenie inNovatsionnykh tekhnologiy pri stroitelstve avtomobilnykh dorog iz ukreplennykh gruntov (opyt Nizhegorodskoy oblasti)]. GosudarstvenNoe kazenNoe uchrezhdenie Nizhegorodskoy oblasti «GlavNoe Upravlenie Avtomobilnykh Dorog»: [website]. URL: <https://www.guad.nNov.ru/otrasl/tekhnologii/primenenie-inNovatsionnykh-tekhnologiy-pri-stroitelstve-avtomobilnykh-dorog-iz-ukreplyennykh-gruntov/> (date of application: 10/05/2025). (rus)
27. Engineering methods for transforming construction properties of foundations (soils) [Inzhenernye metody preobrazovaniya stroitelnykh svoystv osNovaniy (gruntov)]. Bur-shnek: [website]. URL: <http://xn--80aaah3aakblanulcep.xn--p1ai/engineering-methods-of-st-conversion/> (date of application: 10/05/2025). (rus)
28. Hydrophobizers: application, principle of operation, types [Gidrofobizatory: primeneniye, printsip deystviya, vidy]. Ettrilat: [website]. URL: <https://www.ettrilat.ru/articles/i34.html> (date of application: 10/05/2025). (rus)

Information about the authors

Trautvain, Anna I. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile and Railways. E-mail: trautvain@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kozhevina, Alina A. Student of the Department of Automobile and Railways. E-mail: syryhalina@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G.

Received 23.07.2025

Для цитирования:

Траутвайн А.И., Кожевина А.А. Механизмы и факторы, ухудшающие набор прочности грунта, стабилизированного химическими добавками на примере многокомпонентного гидрополимера и концентрированной минеральной смеси POWER STAB // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 1. С. 20–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-20-36

For citation:

Trautvain A.I., Kozhevina A.A. Mechanisms and factors that worsen the strength gain of soil stabilized with chemical additives using the example of a multicomponent hydropolymer and a concentrated mineral mixture of POWER STAB. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 1. Pp. 20–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-20-36